مطالعهٔ تجربی فرآیند شکل‌گیری رژیم شکست کیسه‌ای جت مایع تزریق‌شده در جریان هوا*

مقاله علمی – پژوهشی

یوسف رضائی[۱]   مهران تاجفر[۲]

چکیده *مطالعهٔ تجربی به‌منظور بررسی فرآیند شکل‌گیری رژیم شکست کیسه‌ای جت مایع تزریق‌شده به درون جریان هوا انجام شد. جت مایع توسط یک نازل دایروی به قطر ۲٫۸۳ میلی‌متر در جریان هوا تزریق شده است. از روش سایه‌نگاری جهت آشکارسازی جت مایع استفاده شده و همچنین از یک دوربین سرعت‌بالا جهت ضبط و ثبت فرآیند شکل‌گیری و شکست کیسه‌های تشکیل‌شده بر روی ستون جت مایع، بهره گرفته شده است. عدد وبر هوا بین ۰٫۱ تا ۴۰ و نسبت ممنتوم جت مایع به هوا بین ۵ تا ۳۰ تغییر داده شده است. در این مطالعه یک تحلیل تئوری با در نظر گرفتن وجود تعادل بین نیروهای وارده بر روی یک کیسه انجام شده است که درنهایت یک عدد معیار برای شکل‌گیری کیسه‌ها به دست آمده است. قطر حلقه و اندازهٔ پوسته یا غشاء کیسه‌ها نیز در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که نسبت بی‌بعد قطر حلقه و اندازهٔ پوستهٔ کیسه‌ها عددی ثابت بوده و با تغییر عدد وبر هوا و نسبت ممنتوم تغییر نمی‌کند. همچنین نتایج حاکی از آن است که پوستهٔ کیسه‌ها نسبت قطر حلقهٔ خود رشد بیشتری به سمت جریان هوا می‌کنند.*

واژه‌های کلیدی رژیم شکست کیسه‌ای، تزریق جت مایع، جریان هوا، جریان چند فازی.

Experiments on the Formation Process of Bag Breakup Regime of Injected Liquid Jet into an Airstream

Y. Rezaei   M. Tadjfar

Abstract *An experiment was conducted to investigate the bag breakup process of round liquid jet injected into an airstream. The liquid jet was visualized using shadowgraph technique and also a high-speed camera was used to observe the formation and breakup of bags in a water jet injected from a 2.83 mm diameter nozzle with air Weber number in the range of 0.1 to 40 and the liquid-to-air momentum ratio from 5 to 30. An analysis of the force balance on bags was conducted and a criterion for bag formation is obtained. In this study, the diameter of the bag ring and the size of the membrane of the bag are calculated. Present results indicate that the normalized ring diameter and the membrane size are constant. Results also show that the membrane of a bag grows more than its ring towards the airstream direction.*

Key Words Bag Breakup Regime, Liquid Jet Injection, Airstream, Multiphase flow.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۸/۵/۶ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/۳/۲۵ می‌باشد.

DOI:10.22067/ v31i2.82170

(۱) نویسندهٔ مسئول: کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

(۲) دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

Email: yrezaei@aut.ac.ir

مقدّمه

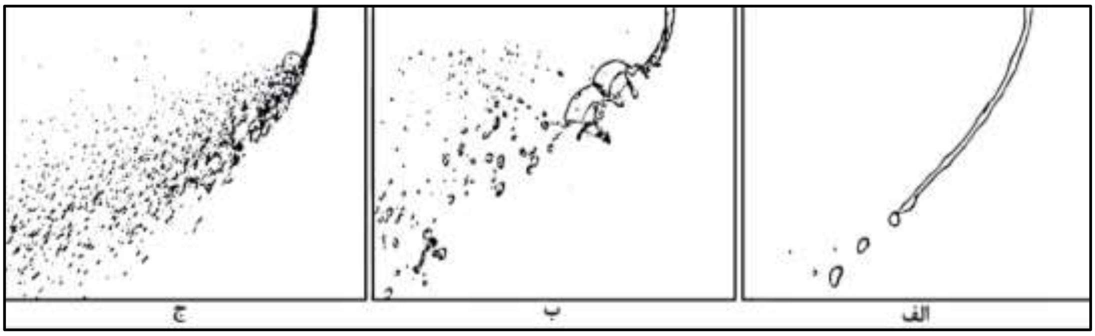
پیشینهٔ تحقیق بر روی تزریق جت مایع به درون جریان هوا به قرن نوزدهم میلادی بازمی‌گردد. زمانی که تزریق و پاشش جت مایع کاربردهای فراوان و متنوعی در صنایع مختلف از جمله در صنایع هوافضا پیدا نمود. تزریق جت مایع به‌صورت عمودی در جریان هوا به دلیل اتمیزاسیون مناسب و نرخ تبخیر بالا، یکی از پیشرفته‌ترین روش‌ها برای سیستم تزریق سوخت است به‌طوری‌که کاربردهای گسترده‌ای در سیستم‌های تزریق سوخت موتورهای پیشرفته هواپیما دارد. از میان مهم‌ترین کاربردها می‌توان به سیستم تزریق سوخت محفظهٔ احتراق توربین گاز، تزریق سوخت در پس‌سوزها و تزریق سوخت در موتورهای رم جت و اسکرم جت اشاره نمود [1,2]. راندمان و بازدهی این موتورها بستگی کامل به پروسه‌های انتشار، اتمیزاسیون و تبخیر جت سوخت مایع تزریق‌شده دارد [1]. این گسترهٔ کاربرد باعث شده است که محقّقان زیادی به پژوهش بر روی فیزیک تزریق مایع و شکست جت مایع بپردازند و از جنبه‌های گوناگون آن را مورد بررسی قرار دهند.

مطالعات اخیر دربارهٔ پروسه‌های شکست جت مایع نشان می‌دهد که فشار دینامیکی جریان هوا باعث مسطح نمودن ستون جت مایع شده و باعث خم شدن آن به سمت جریان هوا می‌شود. بعد از خم شدن جت مایع به سمت جریان هوا، ستون جت مایع شکسته شده و به تکّه‌های (Ligament) بزرگ و قطرات کوچک تبدیل می‌شود [3,4]. با افزایش سرعت جریان هوا، رژیم‌های شکست متفاوتی پدیدار می‌شوند و ستون جت مایع متحمل رژیم‌های متفاوت شکست می‌شود. به‌گونه‌ای که در سرعت‌های پایین جریان هوا، جت مایع در رژیم شکست ستونی (Column Breakup Regime) شکسته می‌شود. با افزایش سرعت هوا ستون جت مایع وارد رژیم شکست کیسه‌ای شده و در رژیم شکست کیسه‌ای (Bag Breakup Regime) شکسته می‌شود و درنهایت با افزایش بیشتر سرعت هوا ستون جت مایع متحمل رژیم شکست ترکیبی (کیسه‌ای/برشی) (Multimode Breakup Regime (Bag/Shear)) و درنهایت رژیم شکست برشی (Shear Breakup Regime) می‌شود [5,6]. شکل (۱) سه نوع از رژیم‌های شکست جت مایع را نشان می‌دهد.

رژیم‌های شکست جت مایع توسط وو و همکاران [7] طبقه‌بندی شدند به‌طوری‌که آنها طی یک مطالعهٔ تجربی مشخصه‌های شکست جت تزریق‌شده در جریان جانبی هوا را مورد بررسی قرار دادند و رژیم‌های شکست جت مایع در جریان هوا را به دو رژیم اصلی: رژیم شکست ستونی و رژیم شکست سطحی (برشی) بر اساس عدد وبر هوا و نسبت ممنتوم مایع به هوا، تقسیم‌بندی نمودند. آنها همچنین ناحیهٔ شکست ستون جت مایع را به چهار زیر ناحیه، شکست ستونی ($We_a < 11$)، شکست کیسه‌ای ($11 < We_a < 30$)، شکست ترکیبی (کیسه‌ای/برشی) ($30 < We_a < 90$) و شکست برشی ($90 < We_a$) تقسیم‌بندی نمودند. درنهایت محل شکست ستون جت را شناسایی کردند و دریافتند که عمق نفوذ جت مایع تابعی از نسبت ممنتوم مایع به هوا است و رابطهٔ‌ای برای پیش‌بینی مسیر جت ارائه دادند. مازالون و همکارانش [8] به بررسی میزان اثر پارامترهایی که روی خواص شکست اولیهٔ جت‌های مایع در جریان عرضی و شکست ثانویه قطرات تأثیرگذار هستند، پرداختند. آنها نیز رژیم‌های شکست اولیه جت مایع را بر اساس عدد وبر هوا به‌صورت زیر طبقه‌بندی نمودند: شکست ستونی ($We_a < 5$)،کیسه‌ای ($5 < We_a < 60$)،ترکیبی ($60 < We_a < 110$) و شکست برشی ($110 < We_a$). سلام و همکاران [9] در چند پژوهش به‌صورت جداگانه به بررسی رفتار جت مایع دایروی به

دورن جریان گازی عرضی پرداختند. آنها جت مایع آرام را با استفاده از مایعات مختلفی همچون آب، الکل، و ترکیب آب-گلیسیرول را طالعه کردند. آنها نیز مشابهٔ کار وو و همکاران [7] و مازالون و همکاران [8] و چهار نوع رژیم‌های شکست برای جت مایع غیر آشفته در جریان هوا را بر اساس افزایش وبر هوا تقسیم‌بندی کرده‌اند: شکست ستونی ($We_a \leq 4$)، شکست کیسه‌ای ($4 < We_a < 30$)، شکست ترکیبی ($30 < We_a < 110$) و شکست برشی ($110 < We_a$). همان‌طور که مشاهده می‌شود در بین پژوهش‌های مختلف نتایج متفاوتی دربارهٔ تقسیم‌بندی‌های انواع رژیم‌های شکست بر اساس عدد وبر هوا وجود دارد. دلیل اصلی وجود اختلاف‌های جزئی بین تقسیم‌بندی‌های رژیم‌های متفاوت را می‌توان به تجربی بودن پژوهش‌ها و روش‌های اندازه‌گیری متفاوت اشاره نمود [2]. اما یک وجه اشتراکی که در بین تمامی این دسته‌بندی‌ها وجود دارد این است که ترتیب آغاز رژیم‌های شکست در آنها یکسان است و همه پژوهش‌ها گزارش یکسانی در مورد ترتیب پدیدار شدن رژیم‌های شکست ارائه نموده‌اند. در جدول (۱) محدودهٔ وقوع رژیم‌های مختلف شکست ستون جت که توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده است آورده شده است.

برخی از محقّقان تأثیر ویژگی‌های مایع را بر روی مشخصه‌های جت تزریق شده در جریان هوا بررسی نموده‌اند. بیروک و همکاران [10]، تأثیر تغییر لزجت جت مایع را بر روی رژیم‌های شکست اولیه مورد مطالعه قرار دادند آنها متوجّه شدند که لزجت مایع تأثیری روی مکانیزم‌های شکست جت تزریق شده در جریان هوا ندارد و همچنین آنها نشان دادند که رابطهٔای که توسط وو و همکاران [7]، برای پیش‌بینی مسیر جت پیشنهاد داده شده بود فقط برای مایعات با لزجت پایین به کار می‌رود و قادر به پیش‌بینی مسیر جت مایعات با لزجت بالا نیست.



شکل (۱): سه نوع متفاوت از رژیم‌های شکست. الف) شکست ستونی، ب) شکست کیسه‌ای، ج) شکست ترکیبی (کیسه‌ای/برشی)

جدول (۱): اعداد وبر هوا متناظر با آغاز رژیم‌های شکست مختلف

رژیم شکست	وو و همکاران [7]	سلام و همکاران [5]	مازالون و همکاران [8]
شکست ستونی	$We_a < 11$	$We_a \leq 4$	$We_a < 5$
شکست کیسه‌ای	$11 < We_a < 30$	$4 < We_a < 30$	$5 < We_a < 60$
شکست کیسه‌ای / برشی	$30 < We_a < 90$	$30 < We_a < 110$	$60 < We_a < 110$
شکست برشی	$90 < We_a$	$110 < We_a$	$110 < We_a$

تمبه و همکاران [11]، تأثیر کشش سطحی مایعات را بر روی رفتار ستون جت مورد بررسی قرار دادند، آنها دریافتند که در رژیم شکست سطحی، مایعات با کشش سطحی پایین قطره‌های کوچک‌تری در نسبت با مایعات با کشش سطحی بالا تولید می‌شود و همچنین آنها همانند وو و همکاران [7]، متوجّه دو نوع رژیم شکست شدند: شکست ستونی که در نسبت ممنتوم و وبر هوای پایین رخ می‌دهد و شکست سطحی که در نسبت ممنتوم و وبر هوای بالا اتفاق می‌افتد. استنزلر و همکاران [12]، گزارش دادند که با افزایش لزجت مایع، ستون جت مایع تمایل بیشتری به خم شدن در جهت جریان هوا را دارد. برومند و همکاران [13] طی یک مطالعهٔ تجربی به بررسی پارامترهایی همچون رژیم شکست اولیه، مسیر و ارتفاع شکست جت مایع تزریق شده به درون جریان هوای آشفته پرداختند. آنها گزارش نمودند که افزایش شدت آشفتگی جریان هوا باعث تأخیر شکل‌گیری رژیم شکست کیسه‌ای می‌شود. همچنین آنها متوجّه شدند که ستون جت مایع در جریان هوای آشفته نسبت به جریان هوا بیشتر خم شده که این منجر به کاهش ارتفاع شکست جت مایع می‌شود.

هندسهٔ نازل یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر رفتار جت مایع تزریق شده است که می‌تواند باعث ایجاد بیشترین تغییرات در شکل ستون جت مایع، نحوهٔ شکستن و محل شکست جت مایع شود. در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده، جت‌های دایروی بررسی شده‌اند و جت‌های غیردایروی همچون جت‌های بیضوی و مستطیلی کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. جت‌های غیر دایروی باعث افزایش ناپایداری جت مایع شده و فرآیند شکست را تسریع می‌بخشند. از دیدگاه احتراقی، جت‌های غیردایروی باعث افزایش اختلاط سوخت شده و می‌توانند باعث بهبودی راندمان و عملکرد احتراق و کاهش ناپایداری‌های آن شوند [14,15]. جدیدی و همکاران [16] ویژگی‌های جت‌های دایروی و بیضوی تزریق شده به درون جریان هوا را به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آنها گزارش نمودند که جت‌های بیضوی نفوذ کمتری نسبت به جت دایروی به درون جریان هوا می‌کنند و همچنین در شرایط یکسان، جت‌های بیضوی طول شکست کمتری نسبت به جت دایروی دارند یا به‌عبارت‌دیگر جت‌های بیضوی نسبت به جت دایروی زودتر شکسته می‌شوند. سانگ و همکاران [17] تأثیر هندسهٔ نازل بر روی مسیر ستون جت‌های مایع بیضوی و دایروی را مورد بررسی تجربی قرار دادند و با استفاده از داده‌های تجربی روابطی برای پیش‌بینی مسیر جت‌های بیضوی و دایروی پیشنهاد نمودند. جابری و تاج‌فر [18,19] طی دو مطالعهٔ تجربی و تئوری به بررسی ساختار و مشخصه‌های ناپایداری نظیر فرکانس و طول موج نوسانات ایجاد شده حاصل از پدیدهٔ تغییر محور (Axis-Switching Phenomenon) جت‌های مایع بیضوی و مستطیلی تزریق شده به درون هوای ساکن پرداختند. آنها متوجّه شدند که پدیدهٔ تغییر محور جت‌های غیر دایروی نقش بسیار مهمی در تعیین نوسانات جت‌ها دارد و همچنین آنها دریافتند که افزایش نسبت منظری جت‌های غیر دایروی باعث افزایش طول موج پدیدهٔ تغییر محور می‌شود.

محاسبهٔ اندازهٔ قطرات و کیسه‌های تشکیل شده در رژیم‌های مختلف که نیز یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر نحوهٔ اختلاط سوخت با هوا و بازدهٔ احتراق است، اخیراً توجّه برخی از محقّقان را به خود جلب کرده است. از دیدگاه احتراقی قطرات کوچک‌تر به دلیل تبخیر و اتمیزاسیون سریع آنها باعث افزایش اختلاط سوخت و هوا شده و می‌توانند باعث بهبودی عملکرد احتراق بشوند. وو و همکاران [20] در پژوهش دیگری به بررسی قطر میانگین قطرات تشکیل‌شده، سرعت قطرات و شار قطرات تشکیل‌شده را به‌منظور مرتبط کردن ساختار اسپری، مورد بررسی قرار دادند. همچنین به توسعهٔ روابط و تصحیح‌هایی برای پیش‌بینی ساختار اسپری پرداختند. ساختار دوبعدی اسپری و چندین پدیدهٔ مختلف اسپری توسط آنها شناسایی شد. اینامورا

و همکارانش [21] با استفاده از روش پی‌دی‌پی‌ای به اندازه‌گیری سایز قطره در ستون اسپری و سرعت امواج ستون‌های مایع پرداختند. کیم و همکاران [22] توانستند با بررسی تجربی تزریق چندین جت دایروی با قطرهای مختلف و با کمک تحلیل ابعادی، به رابطۀای نیمه‌تجربی برای تخمین قطر میانگین قطرات تشکیل شده برحسب پارامترهای مختلف همچون قطر نازل، عدد وبر جت، عدد رینولدز جت، عدد رینولدز گاز و موقعیت طولی و عرضی جت توسعه دهند. سلام و همکاران [23] در پژوهش دیگری به بررسی کیسه‌های تشکیل شده در رژیم شکست کیسه‌ای پرداختند. آنها دریافتند که اندازۀ کیسه‌های تشکیل شده در رژیم شکست کیسه‌ای با تغییر نسبت ممنتوم و عدد وبر هوا تغییر نمی‌کند و تقریباً دارای مقدار ثابتی است. وانگ و همکاران [24] طی یک مطالعۀ تجربی و تحلیلی به بررسی پارامترهایی همچون طول شکست جت، اندازۀ کیسه‌ها، محل تشکیل کیسه بر روی ستون جت و مدّت زمان تشکیل کیسه پرداختند. آنها نیز بر ثابت بودن اندازۀ کیسه‌ها و تغییر نکردن آن با نسبت ممنتوم و وبر هوا تأکید داشتند و گزارش نمودند که کاهش عدد رینولدز جت باعث می‌شود که کیسه‌ها در فاصلۀ بیشتری نسبت به نقطۀ تزریق تشکیل شوند در حقیقت فاصلۀ تشکیل کیسه بر روی ستون جت افزایش می‌یابد. ژانگ و همکاران [25] به بررسی مقدار پراکندگی قطرات تشکیل شده حاصل از تزریق جت مایع از نازل مخروطی به درون جریان هوا پرداختند. عمیقی و همکاران [26] طی یک مطالعۀ تجربی به محاسبه اندازۀ قطرات ایجاد شده در تزریق جت مایع در جریان هوا با دما و فشار بالا پرداختند. نتایج آنها حاکی از آن است که افزایش قطر نازل و سرعت جت مایع هر دو باعث افزایش نفوذ جت مایع به درون جریان هوا شده ولی باعث کاهش اندازۀ قطرات جت مایع می‌شود. از طرفی دیگر، افزایش سرعت جریان هوا باعث کاهش نفوذ جت مایع به درون جریان هوا شده و همچنین اندازۀ قطرات تشکیل شده را کاهش می‌دهد.

بررسی پیشینه مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که علیرغم اینکه محاسبه اندازۀ قطر قطرات و کیسه‌های تشکیل شده در رژیم‌های مختلف به‌تازگی مورد توجّه بسیاری از محققان قرار گرفته است، ولی تاکنون پژوهشی جامع در مورد چگونگی تشکیل کیسه و همچنین محاسبه پارامترهای آن صورت نگرفته است. به‌طوری‌که در هیچ‌یک از این پژوهش‌ها پارامتر اندازۀ پوسته یا غشاء کیسه مورد محاسبه قرار نگرفته است؛ بنابراین رفتار کیسه خصوصاً مشخصه‌های آن نیاز به بررسی بیشتری دارد که در این پژوهش مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این مقاله ابتدا به بررسی چگونگی و عوامل تشکیل کیسه در رژیم شکست کیسه‌ای پرداخته شده است و سپس پارامترهای یک کیسۀ تشکیل شده بر روی ستون جت مایع همچون: اندازۀ قطر حلقۀ کیسه، اندازۀ پوستۀ کیسه و مدّت زمان رشد کیسه مورد محاسبه و بررسی قرار گرفته است و همچنین مشخصه‌های آن به‌صورت کمی و کیفی تحلیل و مقایسه شده است. درنهایت به محاسبه مسیر ستون جت، طول و ارتفاع محل شکست ستون جت مایع تزریق شده به درون جریان هوا نیز پرداخته شده است.

تجهیزات تجربی، پردازش تصویر و شرایط آزمایش

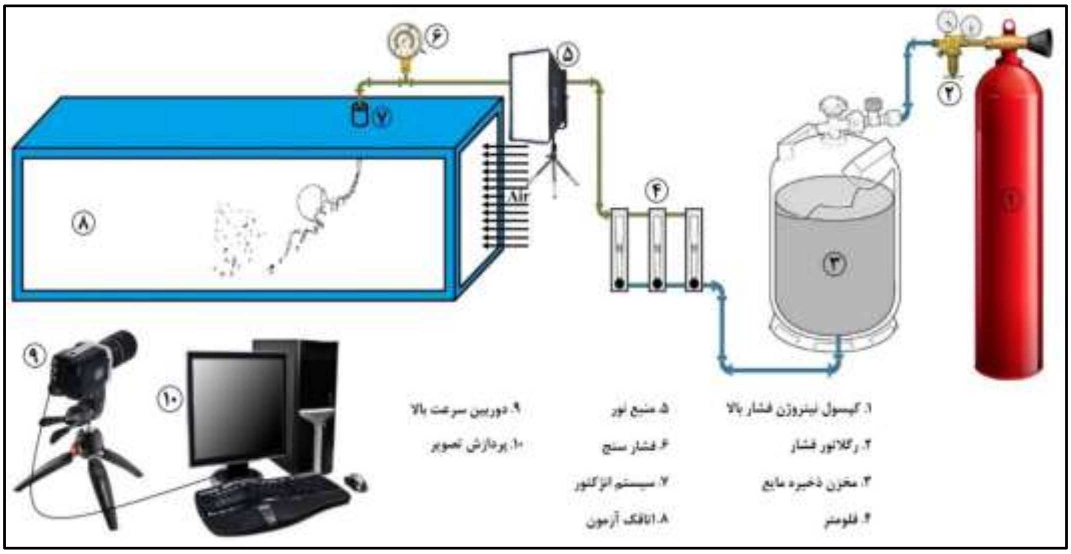
در این بخش به ترتیب به سیستم تزریق جت مایع، تونل باد دو فازی، پردازش تصویر و شرایط آزمایش پرداخته می‌شود.

سیستم تزریق جت مایع

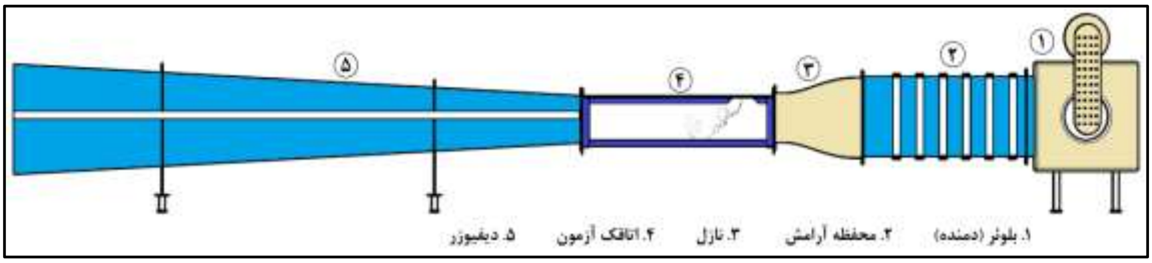
طرح‌واره تجهیزات تجربی و سیستم تزریق جت مایع در شکل (۲) به‌خوبی نشان داده شده است. سیستم تزریق مایع متشکل از کپسول نیتروژن پرفشار، مخزن مایع، فلومتر و انژکتور است. مایع تست شونده در یک مخزن ذخیره و برای ایجاد جریان از زیر مخزن، مایع داخل مخزن توسط گاز نیتروژن تحت فشار قرار می‌گیرد. از

سه فلومتر با بازه‌های کاری مختلف برای اندازه‌گیری دبی جریان آب استفاده شده است. این سه فلومتر که به‌صورت موازی در مدار قرار گرفته‌اند، قادر به اندازه‌گیری دبی جریان در بازه‌های ٤ تا ٤٤ لیتر بر ساعت، ٢٠ تا ١٦٠ لیتر بر ساعت و ١٢٠ تا ٣٦٠ لیتر بر ساعت می‌باشند. درنهایت جت مایع توسط یک نازل که در قسمت بالایی اتاقک آزمون و در فاصلهٔ ٢٠٠ میلی‌متری از ورودی هوا به اتاقک آزمون نصب شده است، به داخل جریان هوا به‌صورت عمودی تزریق می‌شود. لازم به یادآوری است که در این مطالعه از آب به‌عنوان جت مایع تزریق‌شونده استفاده شده است.

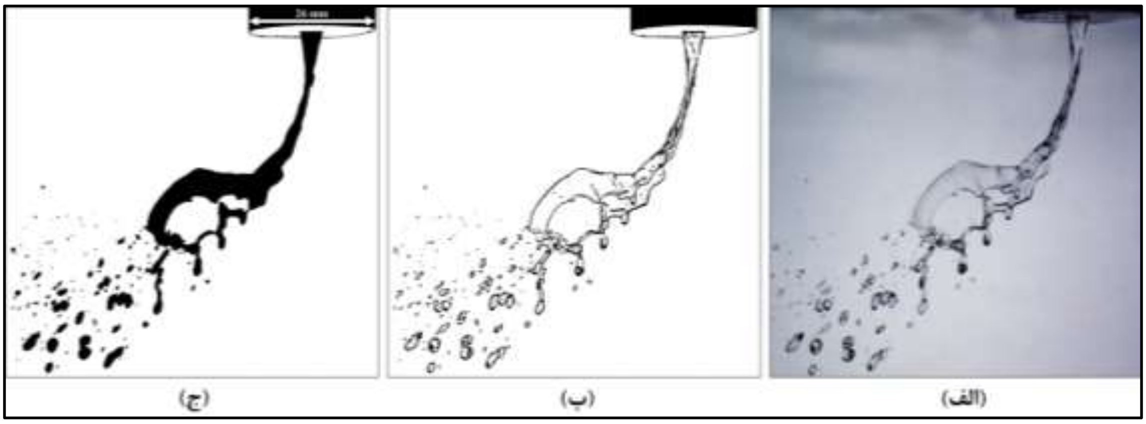
شکل (۳) طرح شماتیک تونل باد دو فازی دانشگاه صنعتی امیرکبیر را نشان می‌دهد. این تونل باد توانایی ایجاد جریان هوای کاملاً یکنواخت با شدت آشفتگی کمتر از ۰٫۱ درصد در داخل اتاقک آزمون با دامنهٔ سرعت بین ۰٫۲ تا ٤٥ متر بر ثانیه را دارد. در محفظهٔ آرامش این تونل باد چندین صفحات لانه‌زنبوری برای ایجاد جریان یکنواخت در اتاقک آزمون، قرار داده شده است. به‌منظور آشکارسازی جریان جت مایع، دیواره‌های کناری اتاقک آزمون تونل باد با استفاده از شیشه‌های شفّاف ساخته شده است.



شکل (۲): طرح‌واره تجهیزات تجربی و سیستم تزریق جت مایع



شکل (۳): طرح شماتیک تونل باد دو فازی



شکل (٤): فرآیند پردازش تصویر. الف) تصویر اصلی، ب) شناسایی مرزهای جت مایع، ج) پروفیل جت مایع

پردازش تصویر

جت مایع با استفاده از روش سایه‌نگاری آشکارسازی شده است. با توجّه به فرکانس بالای پدیده‌های حاضر، نیاز به یک دوربین سرعت‌بالا است؛ بنابراین از دوربین نیکون J4-1 استفاده شد که قادر به ثبت تصاویر با مدّت زمان نورگیری ٦٢/٥ میکروثانیه و سرعت ١٢٠٠ فریم بر ثانیه و با وضوح تصویر ٣٤٨٨ × ٥٢٣٢ است. پس از عکس‌برداری، تصاویر ثبت‌شده باید مورد پردازش قرار بگیرند تا امکان به دست آوردن داده‌های مورد نیاز فراهم شود؛ بنابراین یک کُد در نرم‌افزار متلب نوشته شد که امکان پردازش تصاویر را میسر می‌سازد. پردازش تصاویر در دو مسیر انجام می‌شود. در مسیر اول ابعاد فیزیکی یک پیکسل از هر تصویر مشخص می‌شود. بدین منظور، از قطر خارجی انژکتور که اندازهٔ مشخصی (٢٦ میلی‌متر) دارد و سایه آن نیز در تصاویر ثبت می‌شود، به‌عنوان مقیاس استفاده شده است. کُد به‌صورت خودکار مقیاس را شناسایی کرده و با شمارش تعداد پیکسل آن، می‌تواند ابعاد فیزیکی هر پیکسل را محاسبه کند (شکل (٤– ج)). در مسیر دوم پردازش تصویر، عکس خام جت مایع (شکل (٤– الف)) دریافت می‌شود و در اولین مرحله، ستون جت شناسایی شده و مرز سایه‌های آن از تصاویر پس‌زمینه جدا می‌شود (شکل (٤– ب)). در گام نهایی پروفیل اصلی ستون جت مایع مشخص می‌شود.

به کمک این پروفیل نهایی می‌توان پارامترهای مورد نیز از ستون جت همانند اندازهٔ قطر حلقه و پوستهٔ کیسه، طول و ارتفاع شکست جت و غیره را به دست آورد. نهایتاً به کمک بعد فیزیکی به دست آمده در مسیر اول پردازش تصویر، تعداد پیکسل به دست آمده برای هر پارامتر به طول فیزیکی تبدیل می‌شود.

در حیطهٔ بررسی تزریق جت مایع به کمک تصاویر سایه‌نگاری دو چشمه خطا وجود دارد: عدم قطعیت اندازهٔ پیکسل و عدم قطعیت طول یک کمیت. در ادامه به نحوهٔ محاسبه آن‌ها در این پژوهش پرداخته شده است.

اگر اندازهٔ هر پیک‌سل به صورت رابطهٔ زیر تعریف نماییم:

$$\delta = \frac{D}{N} \qquad (١)$$

که در آن D بیانگر اندازهٔ طولی مقیاس و N بیانگر تعداد پیکسل‌های آن مقیاس است. ؛ بنابراین رابطهٔ عدم قطعیت اندازهٔ پیکسل خواهد بود:

$$\sigma_\delta = \left\{\left(\frac{\partial\delta}{\partial D}\sigma_D\right)^2 + \left(\frac{\partial\delta}{\partial N}\sigma_N\right)^2\right\}^{\frac{1}{2}} \qquad (٢)$$

با توجّه به رابطهٔ (١) خواهیم داشت که $\frac{\partial\delta}{\partial D} = \frac{1}{N}$ و $\frac{\partial\delta}{\partial N} = -\frac{D}{N^2}$ اکنون با جایگذاری در رابطهٔ (٢)، رابطهٔ نهایی برای عدم قطعیت اندازهٔ پیک‌سل به صورت رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_\delta=\left\{\left(\frac{1}{N}\sigma_D\right)^2+\left(\frac{D}{N^2}\sigma_N\right)^2\right\}^{\frac{1}{2}} \quad (۳)$$

که در آن σ_D عدم قطعیت طول مشخصه مقیاس یا نشانگر پیکسل است که در این پژوهش مقدار ۰٫۰۵ میلی‌متر محاسبه گردیده است و σ_N عدم قطعیت تعداد پیکسل است و از میانگین تعداد زیادی عکس به دست می‌آید.

برای اندازه‌گیری طول یک کمیت در فرآیند پردازش تصویر، از رابطهٔ (٤) استفاده شده است:

$$L=M\delta \quad (٤)$$

که در این رابطهٔ M تعداد پیکسل و δ اندازهٔ پیکسل است. برای محاسبه عدم قطعیت طول اندازه‌گیری شده L داریم که:

$$\sigma_L=\left\{\left(\frac{\partial L}{\partial M}\sigma_M\right)^2+\left(\frac{\partial L}{\partial \delta}\sigma_\delta\right)^2\right\}^{\frac{1}{2}} \quad (٥)$$

که با توجّه به رابطهٔ (٤) داریم که $\frac{\partial L}{\partial M}=\delta$ و $\frac{\partial L}{\partial \delta}=M$. بنابراین عدم قطعیت طول برابر خواهد بود با:

$$\sigma_L=\{(\delta\sigma_M)^2+(M\sigma_\delta)^2\}^{\frac{1}{2}} \quad (٦)$$

که در این رابطهٔ σ_δ از بخش قبل محاسبه شده و σ_M مشابه با σ_N، قابل محاسبه است.

شرایط آزمایش

کلیهٔ آزمایش‌ها در شرایط دمای اتاق و فشار اتمسفریک انجام شده است. در این مطالعه سرعت تزریق مایع بین ۰٫۲۲ تا ۱٫۷٦ متر بر ثانیه و همچنین سرعت هوا بین ۱ تا ۲۹ متر بر ثانیه متغیر ا ست. برای یک نازل دایروی با قطر ۲٫۸۳ میلی‌متر شرایط زیر آزمایش شده است: عدد وبر جت بین ۱٫۸ تا ۱۲۱، عدد وبر هوا بین ۰٫۱ تا ٤۰ و نسبت ممنتوم مایع به هوا بین ۵ تا ۳۰ تغییر کرده است؛ که این محدودهٔ آزمایش‌ها باعث به وجود آمدن رژیم‌های شکست ستونی، شکست کیسه‌ای و ترکیبی می‌شوند. شرایط آزمایش به‌طور خلاصه در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): خلاصه شرایط آزمایش

پارامترها	آب	هوا
چگالی $\rho\ (kg/m^3)$	998	1.225
لزجت $\mu\ (N/m^2)$	8.02×10^{-4}	1.73×10^{-5}
کشش سطحی $\sigma\ (N/m)$	0.0728	—
سرعت $V\ (m/s)$	0.22 - 1.76	1 - 29
وبر We	1.81 - 121	0.1 - 40
نسبت ممنتوم q	5 - 30	—

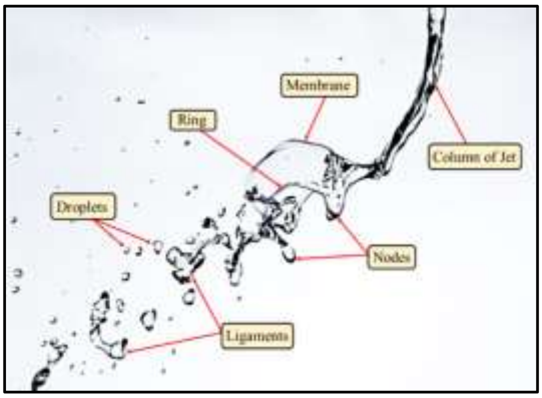
نتایج و بحث

نتایج به دست آمده در پنج بخش ارائه می‌شوند. ابتدا در قسمت آشکارسازی جریان، تصویر جت مایع در رژیم شکست کیسه‌ای مورد تحلیل کیفی قرار می‌گیرند. در بخش بعد به نیروهای وارد بر یک کیسه به‌صورت تحلیلی پرداخته می‌شود. در ادامه اندازهٔ قطر و پوستهٔ کیسه‌ها و مدّت زمان رشد یک کیسه تا قبل از شکست آن بررسی شده است و درنهایت به مسیر ستون جت و محل شکست آن پرداخته خواهد شد.

آشکارسازی جریان

تصاویر سایه‌نگاری به‌خوبی امکان بررسی شکل ظاهری ستون جت و تغییرات آن با پارامترهای مختلف را فراهم می‌کند که می‌تواند کمک به‌سزایی در شناخت رفتار جت باشد. در این مطالعه سه نوع از رژیم‌های شکست جت مایع در اعداد وبر هوای مختلف مشاهده شد. به‌طوری‌که رژیم شکست ستونی در اعداد وبر هوای $We_a<5$ و با افزایش وبر هوا شاهد رژیم شکست کیسه‌ای در اعداد وبر $5<We_a<25$ بودیم و درنهایت با افزایش بیشتر وبر هوا رژیم شکست ترکیبی (برشی/ کیسه‌ای) از عدد وبر هوا $We_a>25$ پدیدار شد. ازآنجایی‌که تمرکز اصلی این پژوهش، مطالعه رژیم شکست کیسه‌ای است بنابراین در ادامه تنها به بررسی مشخصه‌های رژیم

شکست کیسه‌ای می‌پردازیم. شکل (۵) قسمت‌های مختلف ستون جت مایع را در رژیم شکست کیسه‌ای معرفی می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود ستون جت در اثر جریان از جانب هوا تغییر شکل داده و تبدیل به یک کیسه تو خالی شده است. هر کیسه از سه قسمت اصلی پوسته یا غشاء (Membrane)، حلقه (Ring) و گره (Node) تشکیل شده است. رشد کیسه تا رسیدن به حداکثر مقدار خود ادامه پیدا می‌کند و بعدازآن کیسهٔ شکسته شده و به قطرات و تکه‌های مختلف تبدیل می‌شود. در قسمت بعدی توضیحات کاملی در رابطهٔ با چگونگی شکل‌گیری و فروپاشی کیسه در رژیم شکست کیسه‌ای ستون جت داده خواهد شد.



شکل (۵): قسمت‌های مختلف جت مایع در رژیم شکست کیسه‌ای نسبت ممنتوم q = 20 و وبر هوا $\mathbf{We_a = 6}$

نیروهای وارد بر یک کیسه

روند تغییر شکل ستون جت مایع تزریق شده در جریان هوا به‌صورت شماتیک در شکل (٦) نشان داده شده است. جت مایع پس از تزریق، به درون جریان هوا نفوذ می‌کند. جریان هوا با برخورد با ستون جت مایع سرعت خود را سریعاً از دست داده که درنتیجه منجر به افزایش فشار استاتیک در قسمت بالادست ستون جت مایع می‌شود. افزایش اختلاف فشار استاتیک بین بالادست و پایین‌دست ستون جت باعث تغییر شکل مقطع ستون جت مایع می‌شود. درنتیجه سطح مقطع ستون جت از شکل دایروی به شکل بیضوی تغییر می‌کند. همان‌طور که در شکل (٦) نشان داده شده، قطر ستون جت در امتداد جریان هوا کاهش می‌یابد.

نیروی درگ آیرودینامیکی جریان هوا نیز باعث تغییر شکل بیشتر ستون جت مایع شده که درنهایت ستون جت تبدیل به یک کیسهٔ تُو خالی می‌شود. زمانی که سرعت جریان هوا در کناره‌های ستون جت افزایش می‌یابد فشار جریان هوا در اطراف ستون جت مایع کاهش پیدا می‌کند؛ بنابراین، فشار داخل کیسه بیشتر از فشار خارج کیسه است. این اختلاف فشار باعث رشد کیسه می‌شود. با رشد کیسه ضخامت پوستهٔ کیسه کاهش و قطر حلقهٔ کیسه افزایش می‌یابد. رشد کیسه تا زمانی که ضخامت کیسه به‌اندازهٔای نازک شده باشد که دیگر کشش سطحی مایع توانایی غلبه بر نیروی درگ آیرودینامیکی جریان هوا را نداشته باشد، ادامه پیدا می‌کند. بعدازآنکه کیسه به حداکثر رشد خود رسید، پوستهٔ کیسه شکسته می‌شود. پس از شکست شدن کیسه، قطرات مختلف و با اندازهٔهای گوناگونی تولید می‌شود که این قطرات به سه دسته مشخص تقسیم می‌شوند: ۱. قطره‌های گره‌ای (Node-Droplets) که قطره‌های نسبتاً بزرگی هستند و توسط گره کیسه‌های تولید می‌شوند، ۲. قطره‌های حلقه‌ای (Ring-Droplets) که ناشی از شکسته شدن حلقهٔ کیسه‌ها تولید می‌شود، ۳. تعداد زیادی از قطره‌های بسیار کوچک که ناشی از شکسته شدن پوستهٔ کیسه تولید شده‌اند که به آنها قطره‌های پوسته‌ای (Membrane-Droplets) گفته می‌شود [24].

عدد وبر هوا یک پارامتر بسیار مهم برای تعیین رژیم‌های شکست جت مایع تزریق شده به درون جریان هوا است. همان‌طور که در قسمت مقدّمه به آن اشاره شد محقّقان مختلف عدد وبر هوای متفاوتی برای رژیم‌های شکست گزارش نموده‌اند. برای مثال مازالون و همکارانش [8] گزارش نمودند که برای جریان با عدد آنسرج کمتر از ۰٫۱، رژیم شکست کیسه‌ای از عدد وبر هوا $We_a > 5$ شروع می‌شود. در این مطالعه یک تحلیل تئوری ساده برای پیش‌بینی عدد وبر هوای بحرانی برای

رژیم شکست کیسه‌ای، انجام شده است. در تحلیلی که صورت گرفته، فرض شده است که کیسه حداکثر رشد خود را کرده و نیروی‌های وارد بر کیسه در حالت تعادل قرار دارند. همچنین فرض شده است که پوستهٔ کیسه به‌صورت یک نیم‌کره و با قطر d_r است. نیروهای وارد شده بر یک کیسه به‌صورت شماتیک در شکل (۷) نشان داده شده است.

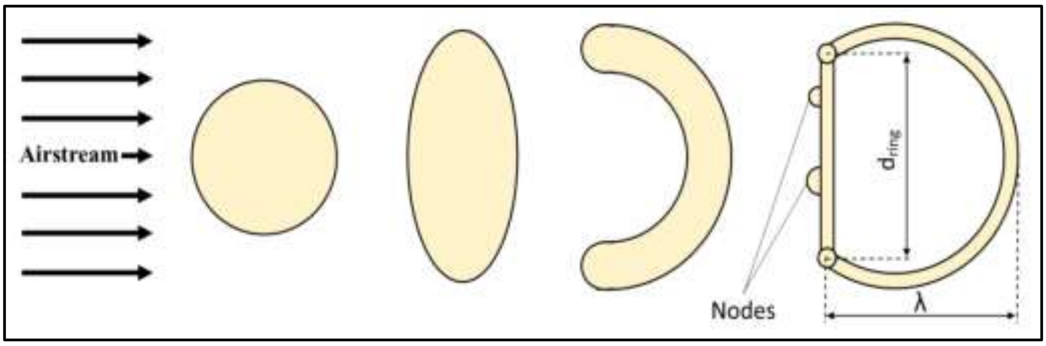
وجود کیسه در جریان هوا باعث شده که سرعت جریان هوا در داخل کیسه به‌سرعت کاهش پیدا کرده درنتیجه تقریباً تمامی فشار دینامیک جریان هوا به فشار استاتیک تبدیل شود؛ بنابراین، فشار داخل کیسه بیشتر از فشار خارج آن است. در این صورت تعادل نیروهای وارد شده بر یک کیسه را می‌توان به صورت رابطهٔ زیر نوشت:

$$(\text{Differential Static Pressure})_{Bag} = (\text{Surface Tension})_{Bag} \quad (۷)$$

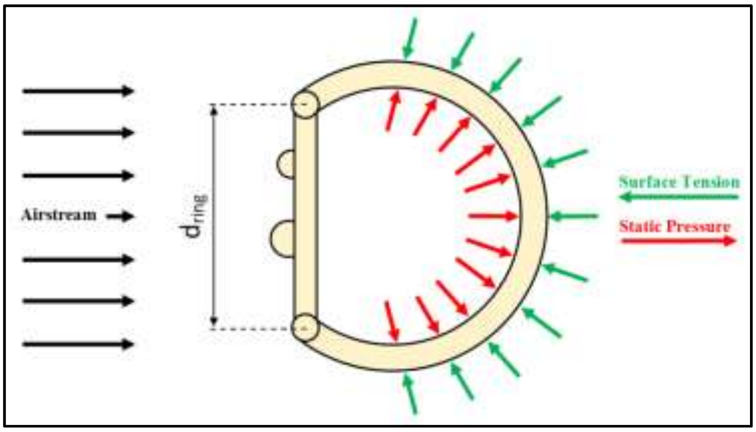
$$\frac{\pi\, d_r^2}{4} \times \frac{1}{2}\, \rho_a\, u_a^2 = \pi\, d_r\, \sigma \quad (۸)$$

$$\frac{\rho_a\, u_a^2\, d_r}{\sigma} = 8 \quad (۹)$$

که در رابطهٔ (۹) مقدار d_r (قطر حلقهٔ کیسه) مجهول بوده و از اندازه‌گیری تجربی به دست می‌آید.



شکل (٦): تغییر شکل سطح مقطع ستون جت مایع تا شکل‌گیری کیسه

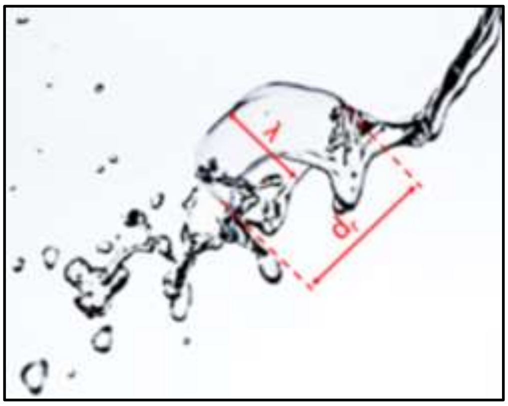


شکل (۷): شماتیک نیروهای وارد بر کیسه

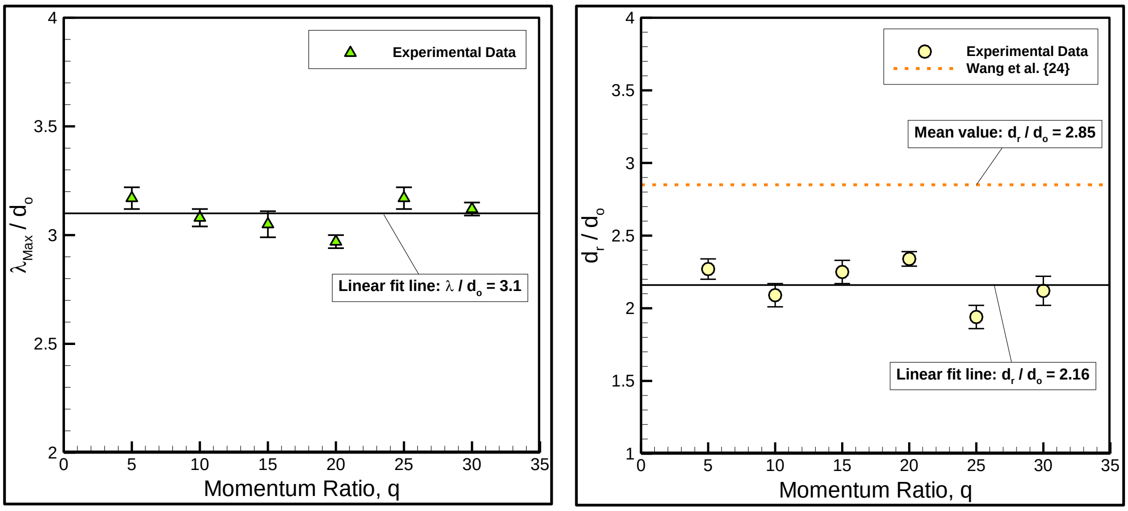
اندازهٔ قطر حلقه و پوستهٔ کیسه‌ها

در این قسمت به نتایج به دست آمده از محاسبه اندازهٔ قطر حلقه و پوستهٔ کیسه‌ها پرداخته می‌شود. در این مطالعه به‌منظور محاسبهٔ اندازهٔ قسمت‌های مختلف یک کیسه از نرم‌افزار ایمج جی (ImageJ) استفاده شده است. در هر شرایط آزمایش، بیش از ۵۰ عکس‌برداری انجام شده و نتایج ارائه شده میانگین همهٔ تصاویر ثبت شده است. پارامترهای اندازه‌گیری شده کیسه در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌نمایید اندازهٔ پوستهٔ کیسه با حرف λ و اندازهٔ قطر حلقهٔ کیسه با حرف d_r مشخص شده است. توجّه داشته باشید که پارامترها در حالتی اندازه‌گیری شده‌اند که کیسه حداکثر رشد خود را کرده است یا به‌عبارت‌دیگر محاسبات درست در لحظهٔ قبل از شکست کیسه، انجام شده است.

نمودارهای شکل (۹) اندازهٔ قطر حلقه و پوستهٔ کیسه‌ها نشان می‌دهند. با توجّه به نتایج به دست آمده مقدار بی‌بعد شده اندازهٔ قطر حلقه و پوستهٔ کیسه‌ها تقریباً ثابت و با میانگین به ترتیب ۲٫۱۶ و ۳٫۱ است و با تغییر نسبت ممنتوم جت به هوا تغییر نمی‌کند. در حقیقت اختلاف فشار استاتیک بین دو طرف ستون جت باعث به وجود آمدن کیسه می‌شود ولی میزان رشد کیسه بستگی به مقدار کشش سطحی مایع دارد زیرا که کشش سطحی مایع تزریق‌شونده درنهایت عامل مقاومت کیسه در برابر شکست آن است. بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که اندازهٔ قطر حلقهٔ کیسه‌ها با تغییر سرعت جت و هوا نیز تغییر نکرده و همواره دارای یک مقدار نسبتاً ثابتی است. نتیجهٔ مشابهی توسط وانگ و همکاران [24] در رابطهٔ با مستقل بودن اندازهٔ کیسه‌ها از نسبت ممنتوم جت به هوا، گزارش شده است.

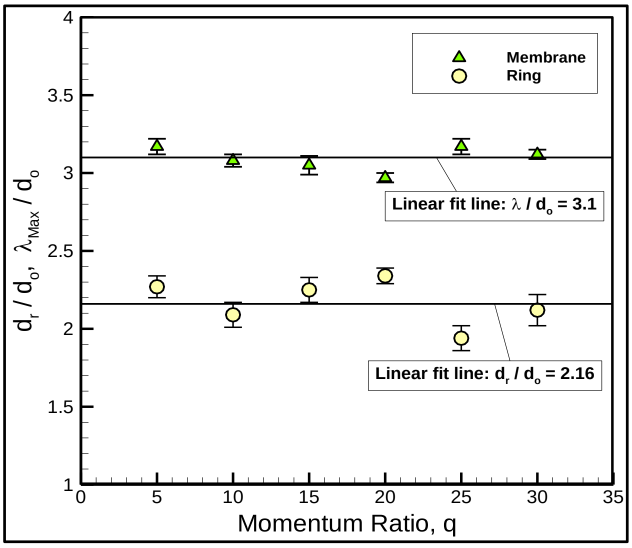


شکل (۸): پارامترهای اندازه‌گیری شده یک کیسه



(ب) (الف)

شکل (۹): نتایج اندازهٔ قطر حلقه و پوستهٔ کیسه‌ها. الف) قطر حلقهٔ کیسه، ب) پوستهٔ کیسه



شکل (۱۰): مقایسه اندازهٔ قطر حلقه و پوستهٔ کیسه‌ها

اکنون با داشـــتن مقدار $\frac{d_r}{d_o} = 2.16$ و قرار دادن آن در رابطهٔ (۹) حداقل عدد وبر هوای مورد نیاز برای شــروع رژیم شــکســت کیســه‌ای جت مایع به دســت می‌آید:

$$We_a = \frac{\rho_a u_a^2 d_o}{\sigma} = \frac{\rho_a u_a^2 d_r}{2.16\,\sigma} \approx 4 \qquad (۱۰)$$

عدد وبر هوای بحرانی رژیم شکست کیسه‌ای که از تحلیل تئوری به دست آمد تقریباً مقدار ٤ است که با عدد گزارش‌شده توسط مازالون و همکارانش [8] که عدد ۵ است، کمی متفاوت است. یکی از دلایل اصلی وجود اختلاف بین تحلیل تئوری با آزمایش تجربی، وجود فرضیاتی است که در تحلیل تئوری بکار گرفتیم. دلیل دیگر، اختلاف فشار استاتیکی که سبب شکل‌گیری کیسه می‌شود در واقعیت کمی بیشتر از نیروی کشش سطحی مایع است؛ زیرا کشش سطحی مایع توانایی غلبه بر نیروی درگ آیرودینامیکی وارد بر کیسه را ندارد.

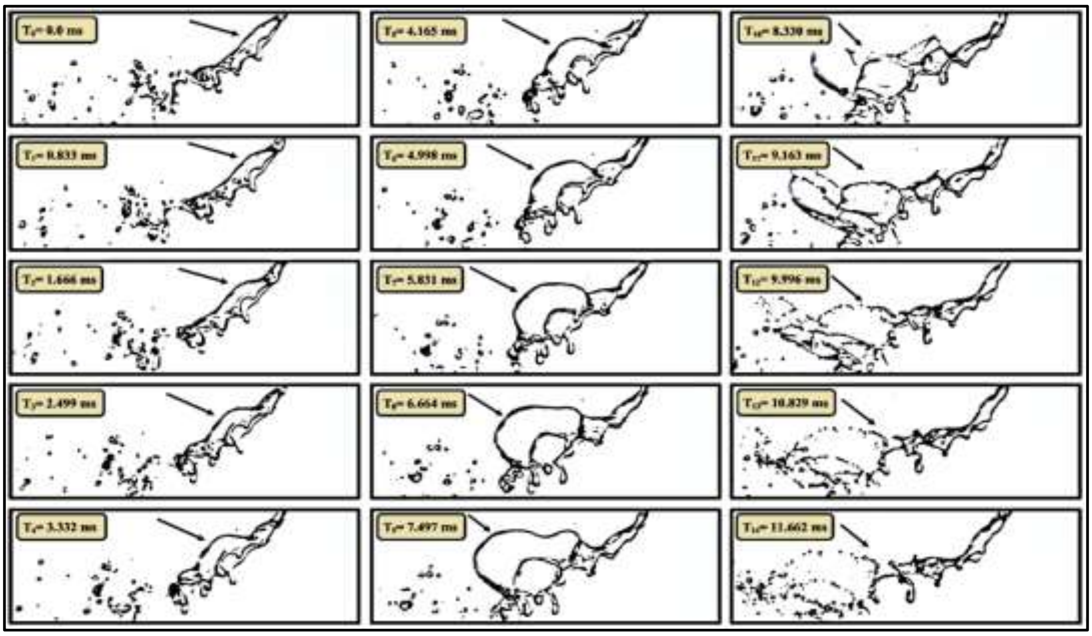
نمودار شکل (۱۰) اندازهٔ قطر حلقه و پوستهٔ کیسه‌های تشکیل شده بر روی ستون جت مایع را با یکُدیگر مقایسه می‌نماید. بر اساس محاسبات صورت گرفته، مشخص شد که اندازهٔ پوستهٔ کیسه کمی بیشتر نسبت به حلقهٔ خود است. یا به‌عبارت‌دیگر پوستهٔ کیسه رشد بیشتر نسبت به حلقهٔ خود می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار میانگین پوستهٔ کیسه ۳,۱ درحالی‌که مقدار میانگین حلقهٔ کیسه ۲,۱٦ به دست آمده است. دلیل این امر این است که در حقیقت کیسه در جریان هوا به‌صورت یک نیم‌کره رشد نمی‌کند بلکه جریان هوا باعث کشیده شدن پوستهٔ کیسه در جهت خود می‌شود. به‌عبارت‌دیگر جریان هوا باعث کِش آمدن پوستهٔ کیسه به سمت پایین‌دست جریان می‌شود و همین امر باعث شده که اندازهٔ پوستهٔ کیسه کمی بیشتر از حلقهٔ خود باشد.

رشد کیسه‌ها در زمان

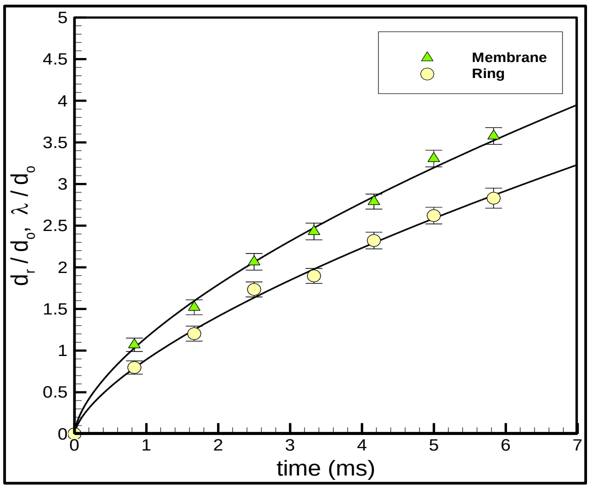
شکل (۱۱) نحوهٔ شکل‌گیری و متلاشی شدن یک کیسه را در زمان به‌طور کامل برای مدّت زمان ۱۱,٦٦۲ میلی‌ثانیه نشان می‌دهد. همان‌طور که پیشتر توضیح داده شد اختلاف فشار دو طرف ستون جت باعث شکل‌گیری کیسه بر روی ستون جت می‌شود. رشد کیسه تا زمانی که دیگر ضخامت پوستهٔ کیسه به‌اندازه‌ای شده باشد که دیگر کشش سطحی مایع توانایی نگه‌داشتن آن را نداشته باشد، ادامه پیدا می‌کند. بعد از رسیدن کیسه به حداکثر اندازهٔ خود، پوستهٔ کیسه شکسته شده و به قطرات مختلفی تبدیل می‌شود. توجّه داشته باشید که هر یک از این تصاویر با فاصلهٔ ۰,۸۳۳ میلی‌ثانیه از هم می‌باشند.

در این مطالعه اندازهٔ رشد پوسته و قطر حلقهٔ کیسه‌ها در حین رشدشان نسبت به زمان نیز مورد بررسی قرار گرفته شده است. ازآنجایی‌که در ابتدای شکل‌گیری کیسه امکان محاسبه اندازهٔ پوسته و قطر حلقهٔ کیسه فراهم نیست بنابراین محاسبات ٦ میلی‌ثانیه قبل از شکست کیسه انجام گردیده است. نمودار شکل (١٢) اندازهٔ پوسته و قطر حلقهٔ کیسه‌ها در حین رشدشان نسبت به زمان برای مدّت ٦ میلی‌ثانیه نشان می‌دهند.

چنانچه در قسمت قبل توضیح داده شد پوسته یک کیسه رشد بیشتری نسبت به قطر حلقهٔ خود می‌کند. دلیل اصلی آن این است که در حقیقت کیسه‌های تشکیل شده به‌صورت کروی شکل نبوده و به سمت جریان هوا کشیده می‌شوند و این کشیدگی باعث شده اندازهٔ پوسته یک کیسهٔ بزرگ‌تر از قطر حلقهٔ خود باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود اندازهٔ پوسته یک کیسه در زمان‌های مختلف نیز بیشتر از قطر حلقهٔ خود است.



شکل (١١): روند شکل‌گیری و شکست یک کیسه



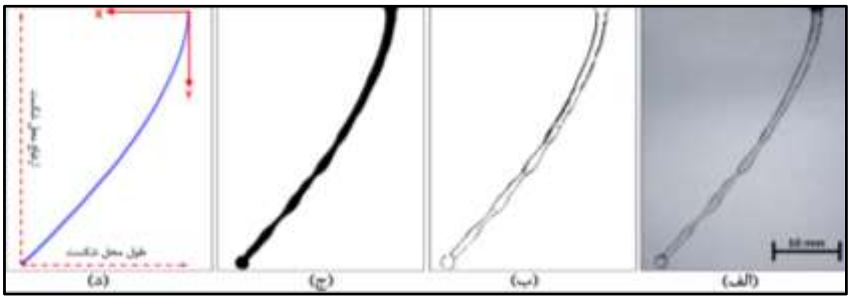
شکل (١٢): مقایسهٔ رشد اندازهٔ قطر حلقه و پوستهٔ کیسه در زمان

مسیر، طول و ارتفاع محل شکست ستون جت مایع

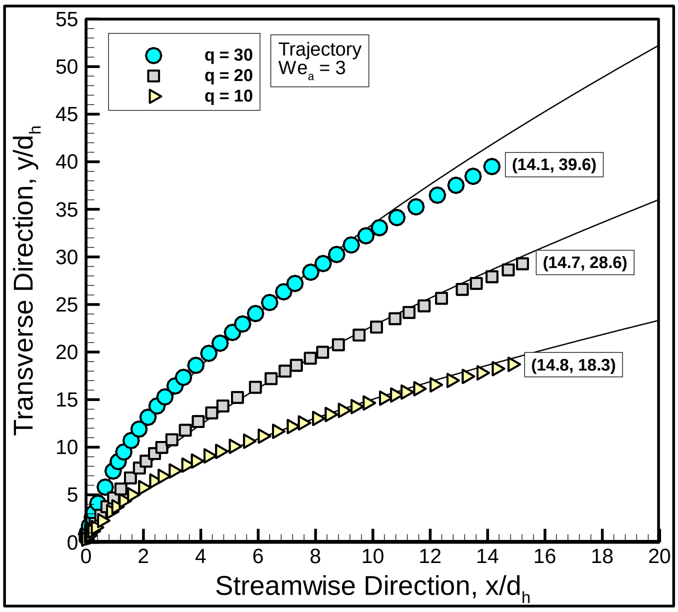
با توجّه به توضیحاتی که در قسمت پردازش تصویر داده شد، با داشتن تصویری از جت مایع تزریق شده به درون جریان هوا (شکل (۱۳– الف)) به‌راحتی می‌توان مرزهای جت مایع را شناسایی کرد (شکل (۱۳– ب)) و سپس پروفیل ستون جت مایع را به دست آورد (شکل (۱۳– ج)). درنهایت با داشتن پروفیل ستون جت مایع، می‌توان پارامترهایی همچون مسیر، طول و ارتفاع محل شکست ستون جت را محاسبه نمود. شکل (۱۳) فرآیند پردازش ستون جت مایع را نشان می‌دهد.

در این پژوهش تغییر مسیر ستون جت مایع با تغییر نسبت ممنتوم در شرایط یکسان و در عدد وبر هوای ثابت $We_a = 3$ بررسی شده است. همان‌طور که در نمودارهای شکل (۱٤) مشاهده می‌شود، نتایج حاکی از آن است که افزایش نسبت ممنتوم جت به هوا، باعث کاهش خمیدگی ستون جت به سمت جریان هوا می‌شود یا به‌عبارت‌دیگر زمانی که جت مایع با نسبت ممنتوم بالا به درون جریان هوا تزریق می‌شود، ستون جت مقاومت بیشتری در برابر تغییر مسیر به سمت جهت جریان هوا می‌کند. پر واضح است که نمودار $q = 10$ شکل (۱٤) به دلیل پایین بودن نسبت ممنتوم جت به هوا، ستون جت بیشتر به سمت جریان هوا منحرف گردیده است. نتیجهٔ مشابهی توسط وو و همکاران [7] و تمبه و همکاران [11] در رابطهٔ با تأثیر نسبت ممنتوم بر روی مسیر ستون جت مایع، گزارش شده است. افزایش نسبت ممنتوم همچنین باعث افزایش نفوذ ستون جت به درون جریان هوا نیز می‌شود. همان‌طور که در نمودارهای شکل (۱٤) مشاهده می‌شود، ستون جت با نسبت ممنتوم $q = 30$ نفوذ بیشتری به درون جریان هوا نموده است که در ادامه مورد بحث قرار خواهد گرفت.

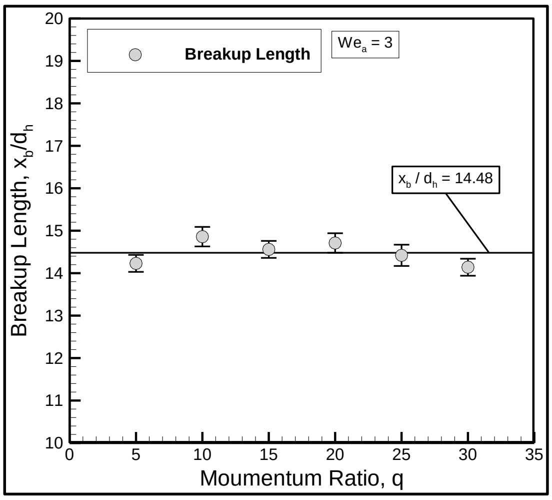
شکل (۱۵) مقادیر مربوط به طول و ارتفاع محل شکست ستون جت مایع را نشان می‌دهد. توجّه داشته باشید که محور مختصات درست در نقطهٔ تزریق جت قرار گرفته بنابراین اندازه‌گیری‌ها نسبت به آن نقطه صورت گرفته است (شکل (۱۳– ج)). با توجّه به اینکه شکسته شدن جت به دلیل ماهیت غیریکنواخت آن در یک نقطه ثابت رخ نمی‌دهد درنتیجه نتایج ارائه شده در این مطالعه میانگین ۵۰ عدد از تصاویر گرفته شده است. همان‌طور که در نمودار (شکل (۱۵– الف)) مشاهده می‌شود، نتایج حاکی از آن است که افزایش نسبت ممنتوم جت به هوا، باعث افزایش ارتفاع محل شکست ستون جت‌ها شده یا به‌عبارت‌دیگر جت مایع بیشتر به درون جریان هوا نفوذ می‌کند و درنتیجه ارتفاع محل شکست جت افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر با افزایش نسبت ممنتوم، طول محل شکست جت مایع تغییر چندانی نمی‌کند و طول شکست تقریباً دارای یک مقدار ثابت و با میانگین ۱٤,٤۸ است (شکل (۱۵– ب)). این نتایج با مشاهدات تجربی وو و همکاران [7] و تمبه و همکاران [11] کاملاً سازگار می‌باشند؛ و هر دو نتایج مشابهی را در رابطهٔ بااینکه افزایش نسبت ممنتوم منجر به افزایش ارتفاع محل شکست و ثابت بودن طول محل شکست می‌شود، گزارش نموده‌اند.



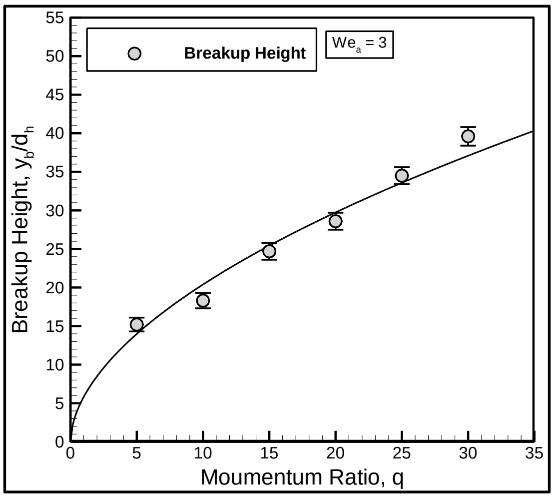
شکل (۱۳): فرآیند پردازش ستون جت، الف) تصویر اصلی، ب) شناسایی مرزهای جت مایع، ج) پروفیل جت مایع، د) مسیر ستون جت مایع



شکل (١٤): مقایسه مسیر ستون جت‌های مایع با افزایش نسبت ممنتوم جت مایع به هوا



(ب)



(الف)

شکل (١٥): مقایسهٔ تغییر محل شکست ستون جت با افزایش نسبت ممنتوم. الف) ارتفاع محل شکست جت، ب) طول محل شکست جت

نتیجه‌گیری

مشخصه‌های رژیم شکست کیسه‌ای جت مایع تزریق شده به درون جریان هوا به‌صورت تجربی و تحلیلی مورد بررسی قرار گرفت. از یک نازل دایروی با قطر ٢,٨٣ میلی‌متر به‌منظور تزریق جت مایع به درون جریان هوا بهره گرفته شده است. جت‌های مایع توسط تکنیک سایه‌نگاری آشکارسازی شده و وضعیت لحظه‌ای جت‌ها با استفاده از یک دوربین سرعت‌بالا ضبط و ثبت گردیده است. تصاویر با استفاده از کُدی که در نرم‌افزار متلب نوشته شده است، مورد پردازش قرار گرفتند. عدد وبر هوا بین ٠,١ تا ٤٠ و نسبت ممنتوم جت مایع به هوا بین ٥ تا ٣٠ برای بررسی تأثیرشان بر روی رژیم شکست

کیسه تغییر داده شده است. در این مطالعه یک تحلیل تئوری با در نظر گرفتن وجود تعادل بین نیروهای وارده بر روی یک کیسه انجام شده است که درنهایت یک عدد معیار برای شکل‌گیری کیسه‌ها به دست آمده است. در این مطالعه همچنین سه نوع متفاوت از رژیم‌های شکست جت مایع در اعداد وبر هوای مختلف مشاهده شد. به‌طوری‌که رژیم شکست ستونی در اعداد وبر هوای $We_a < 5$ و با افزایش وبر هوا شاهد رژیم شکست کیسه‌ای در اعداد وبر $5 < We_a < 25$ بودیم و درنهایت با افزایش بیشتر وبر هوا رژیم شکست ترکیبی (برشی/کیسه‌ای) از عدد وبر هوا $We_a > 25$ پدیدار شد. در این مطالعه اندازهٔ قطر حلقه و پوستهٔ کیسه‌ها نیز مورد بررسی و محاسبه قرار گرفت. بر اساس محاسبات صورت گرفته مشخص گردید که اندازهٔ قطر حلقه و پوستهٔ کیسه‌ها تقریباً دارای یک مقدار ثابت با میانگین به ترتیب ۲٫۱۶ و ۳٫۱ است و با تغییر نسبت ممنتوم جت به هوا تغییر نمی‌کند. همچنین نتایج حاکی از آن است که پوستهٔ کیسه‌ها رشد بیشتری نسبت به قطر حلقهٔ خود می‌کنند که دلیل این امر کشیده شدن پوستهٔ کیسه به سمت جریان هوا است یا به‌عبارت‌دیگر کیسه به‌صورت یک نیم‌کره در جریان هوا رشد نمی‌کند. اندازهٔ پوسته و قطر حلقهٔ کیسه‌ها در حین رشدشان در زمان‌های مختلف برای مدّت ۶ میلی‌ثانیه بررسی گردید. مشخص شد که در زمان‌های مختلف نیز اندازهٔ پوستهٔ کیسه کمی بیشتر از قطر حلقهٔ کیسه است. مسیر ستون جت مایع و همچنین طول و ارتفاع محل شکست ستون جت نیز در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاکی از آن شد که با افزایش نسبت ممنتوم مقدار انحراف ستون جت به سمت جهت جریان هوا کاهش پیدا می‌کند یا به‌عبارتی‌دیگر ستون جت در برابر تغییر مسیر به سمت جریان هوا مقاومت بیشتری می‌کند که درنتیجه باعث افزایش نفوذ جت مایع به درون جریان هوا شده و ارتفاع محل شکست ستون جت افزایش می‌یابد.

واژه نامه

علائم انگلیسی

d	قطر، mm
d_o	قطر نازل، mm
u	سرعت، m/s
We	عدد وبر

علائم یونانی

ρ	چگالی، kg/m^3
σ	کشش سطحی N/m
μ	لزجت N/m^2
λ	اندازهٔ پوستهٔ کیسه

زیرنویس

j	جت مایع
a	هوا
r	حلقه

مراجع

1. Ashgriz, N., "Handbook of atomization and sprays: theory and applications", Springer Science & Business Media, (2011).
2. Broumand, M., Birouk, M. J. P. i. E., and Science, C., "Liquid jet in a subsonic gaseous crossflow: Recent progress and remaining challenges", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 57, pp. 1-29, (2016).

3. T. Chen, C. Smith, D. Schommer, and A. Nejad, "Multi-zone behavior of transverse liquid jet in high-speed flow", *in 31st Aerospace Sciences Meeting*, pp. 453, (1993).
4. Song,Y., Hwang, D. and Ahn, K., "Effect of orifice geometry on spray characteristics of liquid jet in cross flow", i*n 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, pp. 1961, (2017).
5. Sallam. K., Aalburg, C., and Faeth, G. J. A. j., "Breakup of round nonturbulent liquid jets in gaseous crossflow", *AIAA Journal*, Vol. 42, No. 12, pp. 2529-2540, (2004).
6. Schetz, J. A., and Padhye, A. J. A. J., "Penetration and breakup of liquids in subsonic airstreams", *AIAA Journal*, Vol. 15, No. 10, pp. 1385-1390, (1977).
7. Wu, P.-K., Kirkendall, K. A., Fuller, R. P. Nejad, A. S. J. J. and power, o. P.,"Breakup processes of liquid jets in subsonic crossflows", *Journal of Propulsion & Power*, Vol. 13, No. 1, pp. 64-73, (1997).
8. Mazallon, J., Dai,. Z,. Faeth, G. J., and Sprays, A.,"Primary breakup of nonturbulent round liquid jets in gas crossflows", *Atomization and Sprays*, Vol. 9, No. 3, (1999).
9. Aalburg, C. B., G. van Leer., .Faeth, M., Sallam,K. A., and Sprays, J. A., "Properties of nonturbulent round liquid jets in uniform gaseous cross flows", *Atomization and Sprays*, Vol. 15, No. 3, pp. 271-294, (2005).
10. Birouk et al., M., "An experimental study of liquid jets interacting with cross airflows", *Particle & Particle Systems Characterization*, Vol. 20, No. 1, pp. 39-46, (2003).
11. Tambe, S., Jeng, S.-M., Mongia, H., and Hsiao, G., "Liquid jets in subsonic crossflow", *in 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, p. 731, (2005)
12. Stenzler, J. N., Lee, J. G., Santavicca, D. A., Lee, W. J., and Sprays, A.,"Penetration of liquid jets in a cross-flow", *41st aerospace sciences meetings and exhibit. American Institute of Aeronautics and Astronautics*, Vol. 16, No. 8, pp. 887-906, (2006).
13. Broumand, M. and Birouk, M., "Liquid jet primary breakup in a turbulent cross-airflow at low Weber number", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 879, pp. 775-792, (2019).
14. Gutmark, E. and Grinstein, F. J. A .R. O. F. M. "Flow control with noncircular jets", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 31, No. 1, pp. 239-272, (1999).
15. Wang, F. and Fang, T. J. I. J. O. M. F., "Liquid jet breakup for non-circular orifices under low pressures", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 72, pp. 248-262, (2015).
16. Jadidi, M., Sreekumar, V., .and Dolatabadi, A. "Breakup of elliptical liquid jets in gaseous crossflows at low Weber numbers", *Journal of Visualization*, Vol. 22, No. 2, pp. 259-271, (2019).
17. Song Hwang, Y. D. and Ahn, K., "Effect of Orifice Geometry on Column Trajectories of Liquid Jets in Crossflows", *Intl Journal of Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 20, No. 1, pp. 139-149, (2019).
18. Jaberi, A., and Tadjfar, M., "Wavelength and frequency of axis-switching phenomenon formed over rectangular and elliptical liquid jets", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 119, pp. 144-154,

(2019).

19. Jaberi., A. and Tadjfar, M., "Comparative study on interfacial oscillations of rectangular and elliptical liquid jets", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, *Part G: Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 234, No. 7, pp. 1272-1286, (2020).
20. Wu,P.K., Kirkendall, K. A., Fuller, R. P., Nejad, A. S., power, J. J. o. p., "Spray structures of liquid jets atomized in subsonic crossflows", *International Journal of Fluid Mechanics Research*, Vol. 14, No. 2, pp. 173-182, (1998).
21. Inamura, T. Nagai, N. J. J. and Power, o. P., "Spray characteristics of liquid jet traversing subsonic airstreams", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 13, No. 2, pp. 250-256, (1997).
22. Kihm, K. D., Lyn, G., Son, S. J., and Sprays, A., "Atomization of cross-injecting sprays into convective air stream", *Atomization and Sprays*, Vol. 5, No. 4&5, pp. 417-433, (1995).
23. Ng, C.-L., Sankarakrishnan, R., and Sallam, K. J. I. J. o. M. F. "Bag breakup of nonturbulent liquid jets in crossflow", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 34, No. 3, pp. 241-259, (2008).
24. Wang, X.-h., Huang,Y., Wang, S. l., and Liu, Z.-l J. A. j., "Bag breakup of turbulent liquid jets in crossflows", *AIAA Journal*, Vol. 50, No. 6, pp. 1360-1366, (2012).
25. Zhang, H., Bai, B., and Wang,Y. "Quantitative description of droplet dispersion of hollow cone spray in gaseous crossflow", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 93, pp. 398-408, (2018).
26. Amighi. A. and Ashgriz, N. "Global droplet size in liquid jet in a high-temperature and high-pressure crossflow", *AIAA Journal*, Vol. 57, No. 3, pp. 1260-1274, (2019).